

(12)特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19)世界知的所有権機関
国際事務局(43)国際公開日
2004年4月1日 (01.04.2004)

PCT

(10)国際公開番号
WO 2004/027885 A1

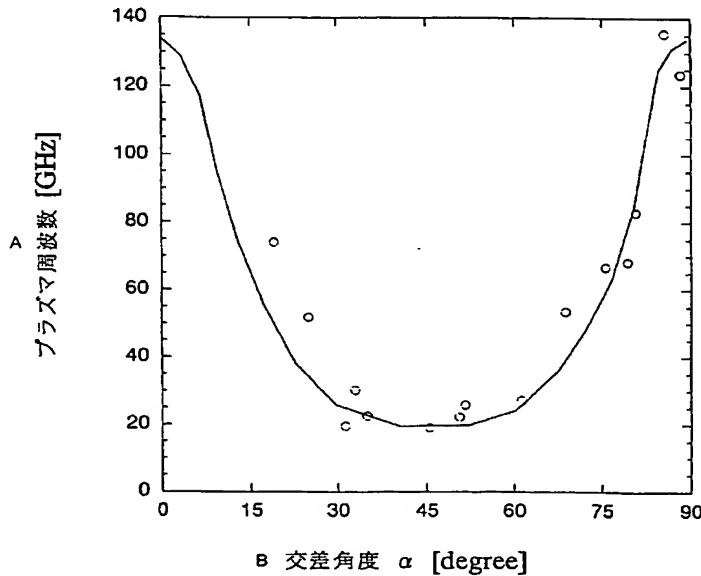
(51)国際特許分類⁷: H01L 39/22, 39/24
 (21)国際出願番号: PCT/JP2003/011912
 (22)国際出願日: 2003年9月18日 (18.09.2003)
 (25)国際出願の言語: 日本語
 (26)国際公開の言語: 日本語
 (30)優先権データ:
 特願2002-275873 2002年9月20日 (20.09.2002) JP
 (71)出願人(米国を除く全ての指定国について): 独立行政法人物質・材料研究機構 (NATIONAL INSTITUTE FOR MATERIALS SCIENCE) [JP/JP]; 〒305-0047 茨城県つくば市千現1丁目2番1号 Ibaraki (JP).

(72)発明者; および
 (75)発明者/出願人(米国についてのみ): 高野 義彦 (TAKANO, Yoshihiko) [JP/JP]; 〒305-0047 茨城県つくば市千現1丁目2番1号 独立行政法人物質・材料研究機構内 Ibaraki (JP). 羽多野 毅 (HATANO, Takeshi) [JP/JP]; 〒305-0047 茨城県つくば市千現1丁目2番1号 独立行政法人物質・材料研究機構内 Ibaraki (JP). 金相宰 (KIM, Sangjae) [KR/JP]; 〒305-0047 茨城県つくば市千現1丁目2番1号 独立行政法人物質・材料研究機構内 Ibaraki (JP). 石井 明 (ISHII, Akira) [JP/JP]; 〒305-0047 茨城県つくば市千現1丁目2番1号 独立行政法人物質・材料研究機構内 Ibaraki (JP). 有沢 俊一 (ARISAWA, Shunichi) [JP/JP]; 〒305-0047 茨城県つくば市千現1丁目2番1号 独立行政法人物質・材料研究機構内 Ibaraki (JP). 戸叶 一正 (TOGANO, Kazumasa) [JP/JP]; 〒305-0047 茨城県つくば市千現1丁目2番1号 独立行政法人物質・材料研究機構内 Ibaraki (JP).

/統葉有/

(54) Title: HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR JOSEPHSON TUNNEL JUNCTION

(54)発明の名称: 高温超伝導ジョセフトンネル接合



A...PLASMA FREQUENCY [GHz]
 B...CROSSING ANGLE α [DEGREE]

WO 2004/027885 A1

(57) Abstract: Two single crystals of high-temperature superconductor are arranged on a substrate to intersect each other at a crossing angle of 0-90 degree and bonded together, thereby forming a single high-temperature superconductor Josephson tunnel junction at the bonded portion. The plasma frequency of the high-temperature superconductor Josephson tunnel junction changes in accordance with the crossing angle.

(57) 要約: 高温超伝導体の2本の単結晶を基板上に、交差角度0度-90度の範囲で交差させて結合し、その結合部に单一の高温超伝導ジョセフトンネル接合を形成

/統葉有/

BEST AVAILABLE COPY



つくば市千現1丁目2番1号 独立行政法人物質・材料
研究機構内 Ibaraki (JP). 立木 昌 (TACHIKI,Masashi)
[JP/JP]; 〒305-0047 茨城県 つくば市 千現1丁目2番
1号 独立行政法人物質・材料研究機構内 Ibaraki (JP).
山下 努 (YAMASHITA,Tsutomu) [JP/JP]; 〒305-0047
茨城県 つくば市 千現1丁目2番1号 独立行政法
人物質・材料研究機構内 Ibaraki (JP).

(74) 代理人: 西澤 利夫 (NISHIZAWA,Toshio); 〒150-0042
東京都 渋谷区 宇田川町 37-10 麻仁ビル 6 階
Tokyo (JP).

(81) 指定国(国内): US.

(84) 指定国(広域): ヨーロッパ特許 (AT, BE, BG, CH, CY,
CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC,
NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR).

添付公開書類:

— 国際調査報告書

2文字コード及び他の略語については、定期発行される
各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語
のガイダンスノート」を参照。

明細書

高温超伝導ジョセフソントンネル接合

技術分野

この出願の発明は、高温超伝導ジョセフソントンネル接合に関するものである。さらに詳しくは、この出願の発明は、プラズマ周波数が交差角度に応じて変化する高温超伝導ジョセフソントンネル接合に関するものである。

背景技術

超伝導体を用いたジョセフソントンネル接合素子（SIS-JJ 素子）は超伝導素子の基本素子であり、高周波素子や SFQ 素子（磁力線の束を利用してスイッチ動作を行う素子）、SQUID 磁気センサー素子などとして応用が進められてきているが、このジョセフソントンネル接合素子が高温超伝導体により作製されれば、性能のさらなる向上が期待される。

この出願の発明の発明者らは、先に、高価な微細加工装置を必要とせず、簡便かつ迅速に高い特性を有するジョセフソン接合を形成することを技術課題とし、これを解決するものとして、高温超伝導体のウィスカーエッチングを交差させて配置し、熱処理によりウィスカーエッチングの結合部又はその付近にジョセフソン接合を形成させることを提案している（特願 2000-250269）。この出願は現在のところ公開されていないが、この出願では、2 本のビスマス 2212 高温超伝導体のウィスカーエッチングを十字形に交差させて MgO 基板上に配置し、MgO 基板ごと炉中に入れ、温度 850℃、酸素分圧 70%、焼成時間 30 分という焼成条件の下で熱処理を行うことによりジョセフソン接合が形成されることを具体的に提示している。

この出願の発明は、以上の先願で提案した技術をさらに発展させ、特性制御が可能な高温超伝導ジョセフソントンネル接合素子の創出を目指し、その先駆けとして、プラズマ周波数が交差角度に応じて変化する

高温超伝導ジョセフソントンネル接合を提供することを解決すべき課題としている。

発明の開示

この出願の発明は、以上の課題を解決するものとして、高温超伝導体の2本の単結晶が、基板上に、交差角度0度－90度の範囲で交差して結合し、その結合部に单一の高温超伝導ジョセフソントンネル接合が形成され、この高温超伝導ジョセフソントンネル接合は、プラズマ周波数が交差角度に応じて変化することを特徴とする高温超伝導ジョセフソントンネル接合（請求項1）を提供する。

またこの出願の発明は、2本の単結晶は、ウィスカ－状、細く加工した単結晶若しくは薄膜のいずれか1種又はこれらの内の2種の組合せであること（請求項2）、高温超伝導体はピスマス系であり、その超伝導相が、2212相、2201相若しくは2223相のいずれか1種又はこれらの相の2種以上の組合せであること（請求項3）をそれぞれ一態様として提供する。

以下、実施例を示しつつ、この出願の発明の高温超伝導ジョセフソントンネル接合についてさらに詳しく説明する。

図面の簡単な説明

図1は、実施例1で得られた高温超伝導ジョセフソントンネル接合について、高温超伝導体単結晶の交差角度とプラズマ周波数の関係を示したグラフである。

図2は、実施例1で得られた高温超伝導ジョセフソントンネル接合に20GHzの高周波を照射した時に観測されたシャピロステップを示したグラフである。

図3は、実施例1で得られた高温超伝導ジョセフソントンネル接合に磁界を印加した時に観測されたフラウンフォーファーパターンを示したグラフである。

図4は、実施例2で得られたb面とc面の高温超伝導ジョセフソン接合の電流電圧特性を示したグラフである。

発明を実施するための最良の形態

この出願の発明の高温超伝導ジョセフソン接合は、上述のとおり、高温超伝導体の2本の単結晶が、基板上に、交差角度0度-90度の範囲で交差して結合し、その結合部に形成される単一の高温超伝導ジョセフソン接合である。

ジョセフソン接合では、超伝導体の間に薄い絶縁体層がサンドイッチされる必要があり、その絶縁体層は2つの結晶の界面に形成される。したがって、この出願の発明の高温超伝導ジョセフソン接合において2本の単結晶を用いるのは、一つに、界面に適切な絶縁体層を形成させるためである。2本の単結晶の界面に形成された絶縁体層を用いるからこそ単一のジョセフソン接合が形成されるのである。もう一つは、単結晶は、多結晶と異なり、その結晶方位が一方向に向いている。したがって、以下に示すように、2本の単結晶の交差角度により臨界電流密度を変化させ、高温超伝導ジョセフソン接合のプラズマ周波数 f_p を制御可能とするためである。

上記のとおり、この出願の発明の高温超伝導ジョセフソン接合において基板上で結合する2本の高温超伝導体単結晶の交差角度、すなわち、交差する2本のビスマス系高温超伝導体単結晶がなす2種類の大きさの角度の内、大きくなき方の角度は、0度-90度の範囲にある。この範囲内の交差角度で交差して結合する高温超伝導ジョセフソン接合のプラズマ周波数 f_p は、臨界電流密度 J_c が交差角度に依存して変化することに起因して変化する。つまり、この出願の発明の高温超伝導ジョセフソン接合は、プラズマ周波数 f_p が交差角度に応じて変化するものであり、したがって、プラズマ周波数 f_p は、基板上で結合させる2本の高温超伝導体単結晶の交差角度を変化させることにより制御可能となる。

高温超伝導体に固有のプラズマ周波数は、一般に数百 GHz から数 THz であり、このため、高温超伝導体を用いた高温超伝導ジョセフソントンネル素子は、それより高い周波数には応答可能であるが、それより低い周波数に応答することはできなかった。しかしながら、上記のとおり、この出願の発明の高温超伝導ジョセフソントンネル接合により、プラズマ周波数 f_p は、高温超伝導体に一般の固有のプラズマ周波数から数 GHz までの 2 – 3 倍以上の範囲で変化可能となる。後述する実施例のように、これまででは応答不可能であった、たとえば 20 GHz における高周波応答（シャピロステップ）が観測される。理論的には、さらに低い周波数まで可能であると見込まれる。

したがって、一般に、高温超伝導ジョセフソントンネル接合素子は、高温超伝導近接効果素子に比べ、 $I_c R_n$ （臨界電流値とシャント抵抗値の積であり、ジョセフソン接合の信号処理能力を示す量）が大きいため、この出願の発明の高温超伝導ジョセフソントンネル接合を利用する高温超伝導ジョセフソントンネル接合素子は、たとえば磁気センサーに応用する場合、SQUID 出力は $I_c R_n$ に比例することから SQUID 出力が増加し、出力／入力比、すなわち、感度が向上すると考えられる。また、高温超伝導ジョセフソントンネル接合素子は、応答可能な最大動作周波数 f_{max} も $I_c R_n$ に比例するため、 $I_c R_n$ が大きくなるほど f_{max} は高くなると考えられる。このことから、この出願の発明の高温超伝導ジョセフソントンネル接合を利用する高温超伝導ジョセフソントンネル接合素子は、たとえば高周波受信機へ応用する場合、 f_p から f_{max} に周波数特性の向上した受信機の作製が可能となると考えられる。さらに、SFQ 素子へ応用する場合、スイッチング時間 $\tau = 1/f_{max}$ で動作する高速素子となり、SIS（超伝導体／絶縁体／超伝導体）接合を用いた量子コンピューターの作製が可能ともなると期待される。

なお、この出願の発明の高温超伝導ジョセフソントンネル接合を形成させる際には、高温超伝導体の 2 本の単結晶を基板上に、交差角度 0 度 – 90 度の範囲で配置し、上述の先願と同様に、熱処理により 2 本の单

結晶を結合させることができる。熱処理時の条件は、温度を0度から高温超伝導体の融点までの範囲、酸素分圧を0-100%の範囲とすることができます。2本の高温超伝導体単結晶の接合面は、a面、b面若しくはc面のいずれか一つの面又はこれらの面の2面の組合せとすることができます。また、2本の細い高温超伝導体単結晶は、ウィスカー状、細く加工した単結晶若しくは薄膜のいずれか1種又はこれらの内の2種の組合せとすることができます。

この出願の発明の高温超伝導ジョセフソントンネル接合が対象とする高温超伝導体は、特に系を選ばず、高温超伝導体と一般に称する各種のものから適宜選択可能である。後述する実施例では、ピスマス系の高温超伝導体を選択しているが、この場合、超伝導相は、2212相、2201相若しくは2223相のいずれか1種又はこれらの相の2種以上の組合せとすることができます。しかも、高温超伝導体には、その超伝導特性を損なわない範囲において組成の調整、元素付加若しくは元素置換などを適宜行うことができる。

実施例

(実施例1)

ピスマス系高温超伝導体である2212相の2本のウィスカー状単結晶をMgO基板上に0度-90度の範囲で交差させて配置し、これを電気炉内で850度、酸素分圧70%の条件で熱処理して結合させ、c面どうしの接合を行った。

【0016】

得られた高温超伝導ジョセフソントンネル接合について臨界電流密度 J_c を測定し、測定された J_c の変化から高温超伝導ジョセフソントンネル接合のプラズマ周波数 f_p の交差角度 α による変化を見積もった。その結果が図1に示したグラフである。

この図1に示したグラフから理解されるように、2本のウィスカー状単結晶の交差角度の変化に応じて高温超伝導ジョセフソントンネル接

合のプラズマ周波数 f_p が変化している。高温超伝導ジョセフソントンネル接合のプラズマ周波数 f_p は 0 度及び 90 度では高温超伝導体に固有の高い値を示し、45 度付近で最も低くなり、20 GHz 程度となっている。熱処理条件などによっては図 1 に示したグラフ以上に大きなプラズマ周波数 f_p の変化が期待される。

以上の結果に基づき、得られた高温超伝導ジョセフソントンネル接合に 20 GHz の高周波を照射した。その結果、図 2 に示したように、電流一電圧特性に高周波応答に特有な階段状のステップ、すなわち、シャピロステップが観察された。高温超伝導ジョセフソントンネル接合が高周波に応答していることが確認され、高周波の受信素子として機能可能であることが確認される。また、約 $40 \mu V$ 間隔でステップが現れており、この事実は、ただ一つのジョセフソントンネル接合が動作したこと、いいかえるならば、単一のジョセフソントンネル接合が形成されたことを証明している。

さらに、得られた高温超伝導ジョセフソントンネル接合について、磁界印加にともなう臨界電流 I_c の変化を調べた。その結果を示したのが図 3 に示したグラフである。なお、磁場は、試料の面内方向に印加した。図 3 に示したグラフの縦軸及び横軸はともに規格化している。たとえば、縦軸は、磁場がゼロであるときの臨界電流を 1 として規格化している。また、図 3 図中に示した L は磁場と垂直方向の試料の幅、 I_c は臨界電流、 Φ_0 は、長さ L に磁束が 1 本挿入されるための磁場をそれぞれ示している。

臨界電流密度は、規格化する前の電流値を面積で割ることにより求められ、図 3 に示したグラフの縦軸に比例する値である。したがって、この図 3 に示したグラフから、磁界を印加することにより臨界電流密度が周期的に変化していることが確認される。この現象はフラウンフォーファーパターンと呼ばれるものであり、高温超伝導ジョセフソントンネル接合が磁界に応答していることを示している。このフラウンフォーファーパターンは、SQUID 磁気センサーの基本特性である。

(実施例 2)

ピスマス系高温超伝導体である 2212 相の 2 本のウィスカーライナーブル単結晶を MgO 基板上に 90 度の交差角で交差させて配置し、これを電気炉内で 850 度、酸素分圧 70 % の条件で熱処理して結合させ、b 面と c 面の接合を行った。

図 4 は、得られた b 面と c 面の高温超伝導ジョセフソントンネル接合の電流電圧特性を示したグラフである。この図 4 に示したグラフから確認されるように、単一の高温超伝導ジョセフソントンネル接合が得られている。すなわち、電流の弱いうちでは電圧が発生していない領域があり、これは、接合を超伝導電流が流れていることを意味しているが、一方、臨界電流値を超えて電流を流すと、突然電圧が発生する。この電圧の発生は、図 4 に示したグラフに現れている飛びに相当する。この飛びが一つであるので単一の高温超伝導トンネル接合が得られていることが確認される。このことから、実施例 1 で確認された各現象が、当然、b 面と c 面の高温超伝導ジョセフソントンネル接合についても同様に起こると合理的に考えられる。

もちろん、この出願の発明は、以上の実施形態及び実施形態によって限定されるものではない。高温超伝導体の種類、単結晶の形態、熱処理条件などの細部については様々な態様が可能であることはいうまでもない。

産業上の利用可能性

以上詳しく述べた通り、この出願の発明によって、プラズマ周波数が交差角度に応じて変化する高温超伝導ジョセフソントンネル接合が実現される。

請求の範囲

1. 高温超伝導体の2本の単結晶が、基板上に、交差角度0度-90度の範囲で交差して結合し、その結合部に单一の高温超伝導ジョセフソントンネル接合が形成され、この高温超伝導ジョセフソントンネル接合は、プラズマ周波数が交差角度に応じて変化することを特徴とする高温超伝導ジョセフソントンネル接合。
2. 2本の単結晶は、ウィスカ-状、細く加工した単結晶若しくは薄膜のいずれか1種又はこれらの内の2種の組合せである請求項1記載の高温超伝導ジョセフソントンネル接合。
3. 高温超伝導体はビスマス系であり、その超伝導相が、2212相、2201相若しくは2223相のいずれか1種又はこれらの相の2種以上の組合せである請求項1又は2記載の高温超伝導ジョセフソントンネル接合。

図 1

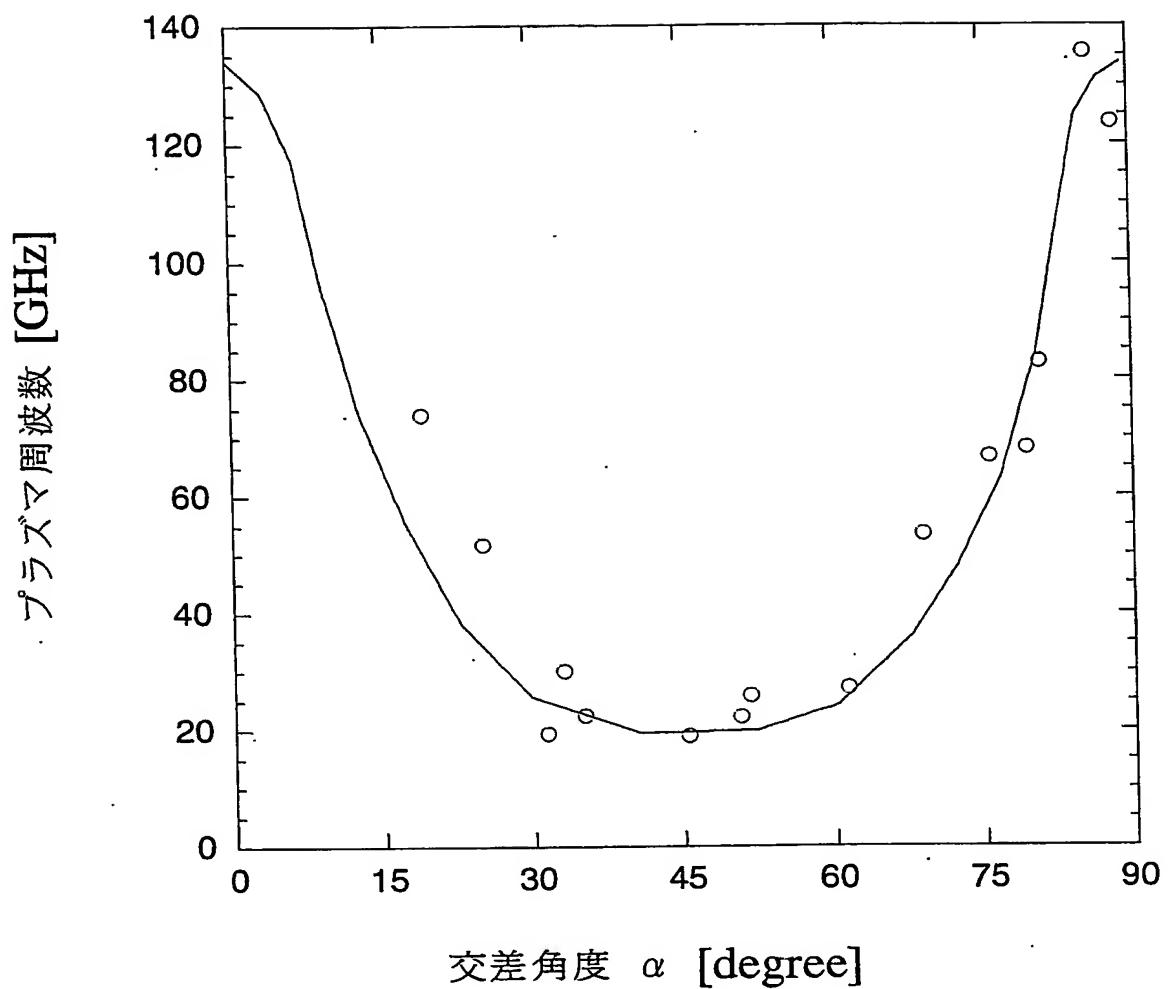


図 2

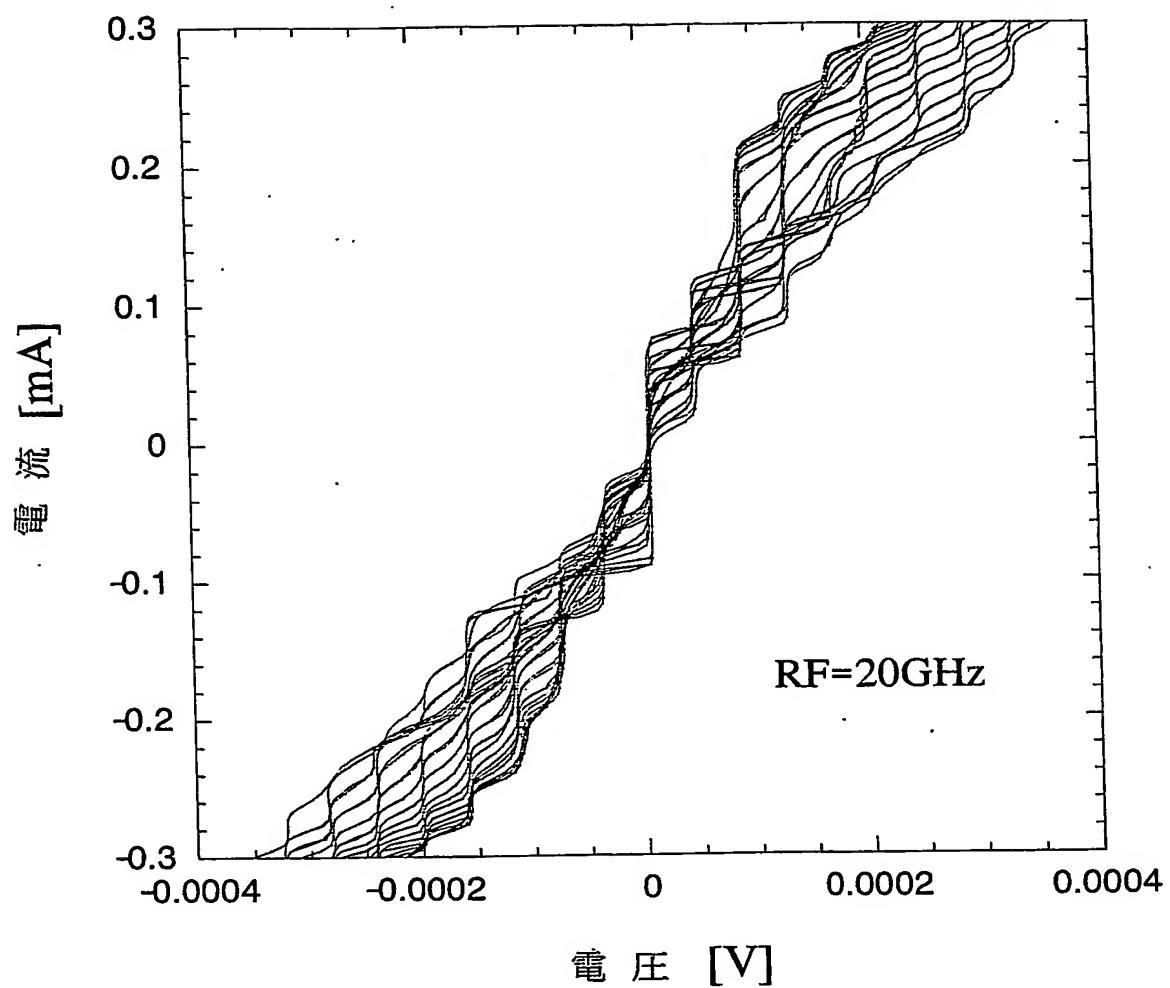


図 3

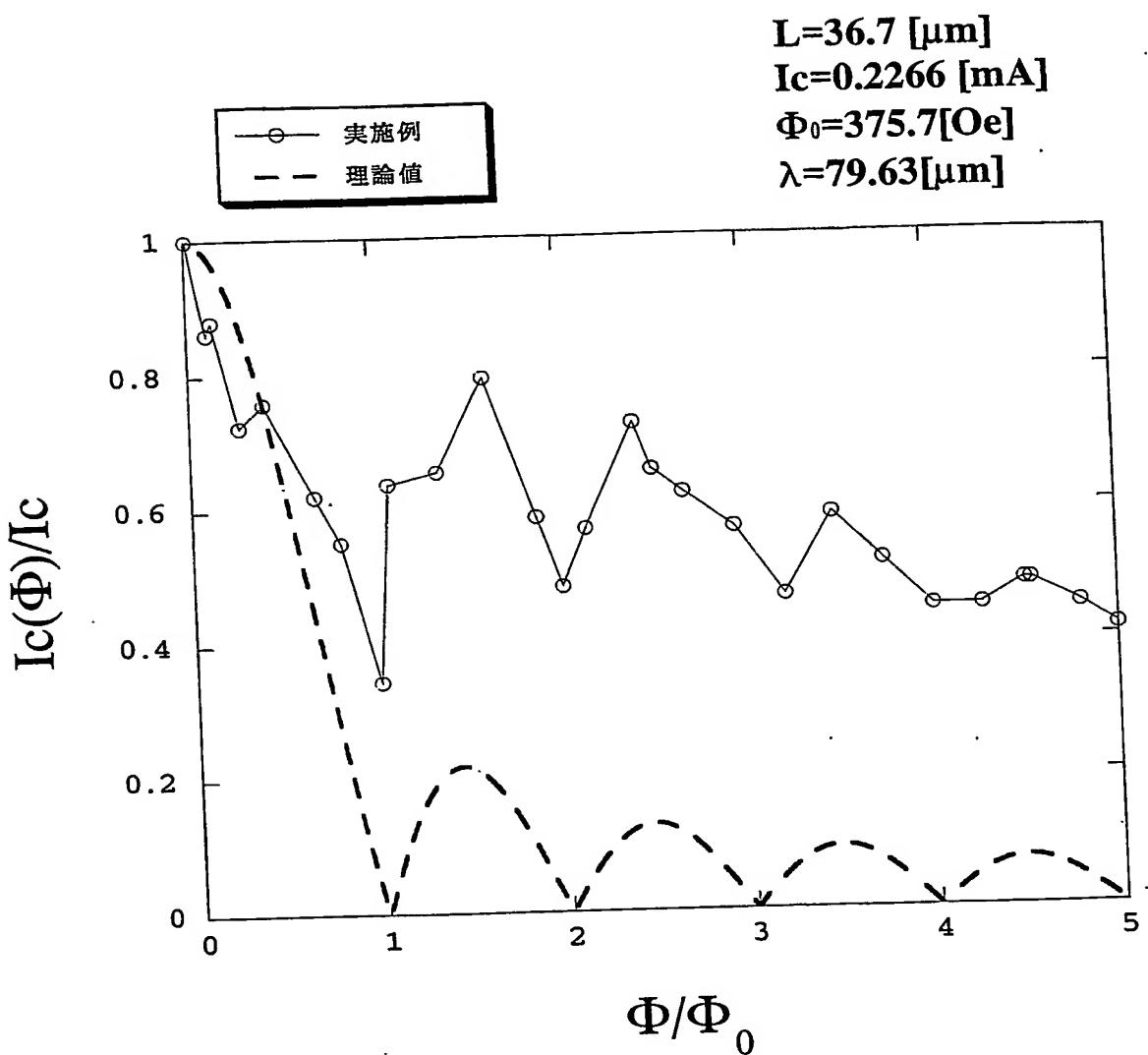
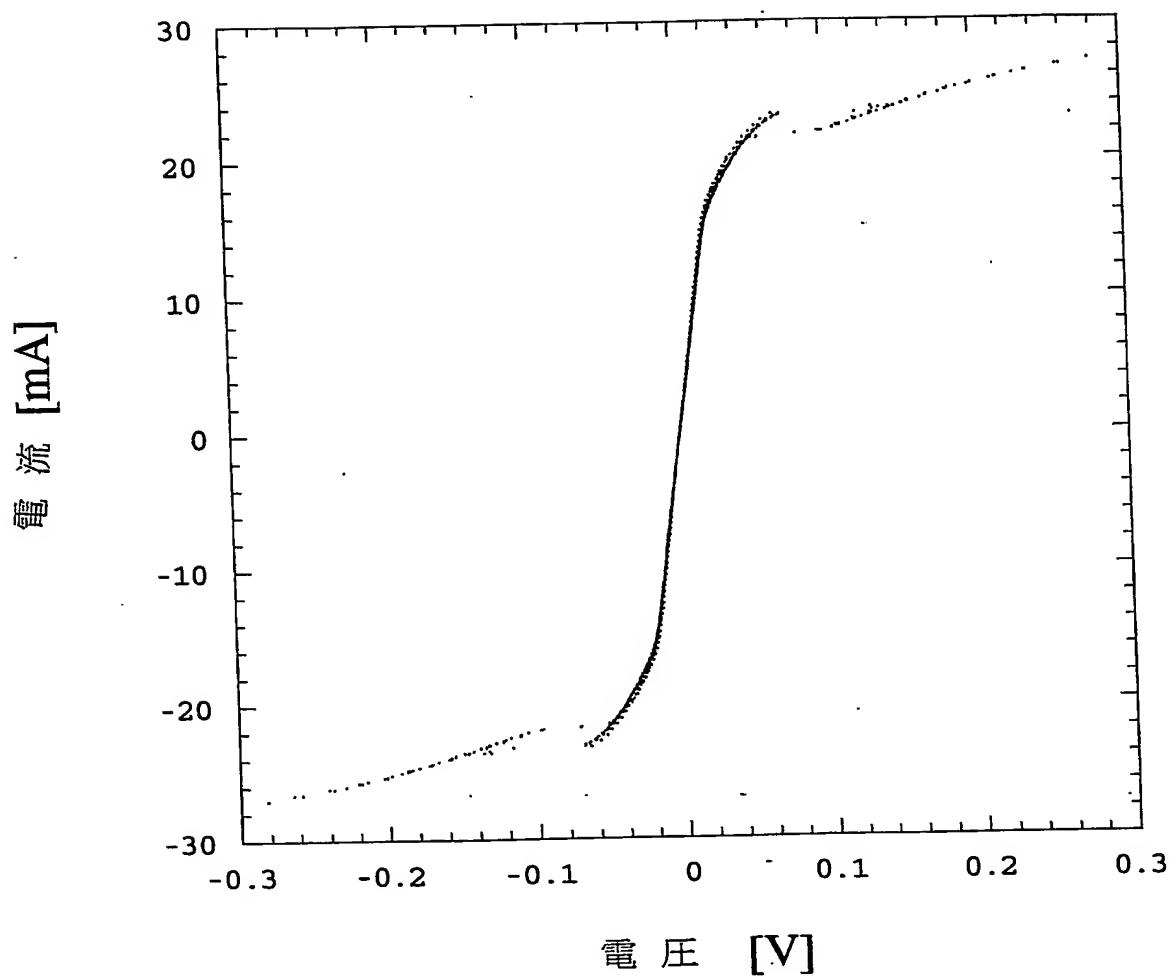


図 4



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP03/11912

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl⁷ H01L39/22, H01L39/24

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
Int.Cl⁷ H01L39/22, H01L39/24

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
 Jitsuyo Shinan Koho 1926-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2003
 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2003 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2003

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 2002/0025586 A1 (TAKANO et al.), 28 February, 2002 (28.02.02), Par. Nos. [0002], [0020] to [0022], [0034]; Fig. 1 & JP 2002-141566 A Par. Nos. [0002], [0009], [0018]; Fig. 1 & EP 1182712 A2	1-3
Y	Hiroyuki SHIBATA, "Do Sankabutsu Cho Dendotai ni Okeru Josephson Plasma Kyomei no Tsuka Sokutei ni yoru Kansoku", Solid state physics, August, 1999, Vol.34, No.8, pages 691 to 698; page 694, left column, Plasma Shuhasu, ω_p no Shiki	1-3

Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"E" earlier document but published on or after the international filing date	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	"&" document member of the same patent family
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 05 December, 2003 (05.12.03)	Date of mailing of the international search report 24 December, 2003 (24.12.03)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office	Authorized officer
Facsimile No.	Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No. PCT/JP03/11912

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 7-273377 A (Research Development Corp. of Japan), 20 October, 1995 (20.10.95), Figs. 1 to 5 (Family: none)	1-3

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))
Int. Cl' H01L39/22, H01L39/24

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))
Int. Cl' H01L39/22, H01L39/24

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1926-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2003年
日本国実用新案登録公報	1996-2003年
日本国登録実用新案公報	1994-2003年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y	US 2002/0025586 A1 (TAKANO et al.) 2002. 02. 28 第[0002]欄、第[0020]欄ー第[0022]欄、第[0034]欄、第1図 & JP 2002-141566 A (第【0002】欄、第【0009】欄、第【0018】欄、第1図) & EP 1182712 A2	1-3
Y	柴田浩行, 銅酸化物超伝導体におけるジョセフソン・プラズマ共鳴 の通過測定による観測, 固体物理, 1999年8月, 第34巻、第8号, pp. 691-698 p. 694左欄のプラズマ周波数 ω の式。	1-3

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日 05.12.03	国際調査報告の発送日 24.12.03
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/JP) 郵便番号 100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	特許庁審査官 (権限のある職員) 正山 旭 電話番号 03-3581-1101 内線 3460 4M 9276 

C (続き) . 関連すると認められる文献		関連する 請求の範囲の番号
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	
A	JP 7-273377 A (新技術事業団) 1995. 10. 20 第1図ー第5図 (ファミリーなし)	1-3

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- BLACK BORDERS**
- IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- FADED TEXT OR DRAWING**
- BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- SKEWED/SLANTED IMAGES**
- COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- GRAY SCALE DOCUMENTS**
- LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.